

# Skalierbare automatisierte Transformation hydrodynamischer Kanalnetzmodelle in vereinfachte hydrologische Modelle

**Manfred Schütze**

Eingereicht ins peer-review-Verfahren: 15.08.2024  
Begutachtet am: 26.09.2024

Kanalnetzsimulation, Modellvereinfachung, Surrogatmodell

*Detaillierte (hydrodynamische) Kanalnetzmodelle sind, insbesondere bei komplexen Netzen, rechenzeitaufwändig. Der Beitrag beschreibt ein automatisiertes Verfahren, das aus einem hydrodynamischen Kanalnetzmodell ein sofort lauffähiges und schnelles vereinfachtes (hydrologisches) Kanalnetzmodell erzeugt. Dadurch, dass im Simulationssystem Simba# hydrodynamische und hydrologische Modellierungsansätze in einem Modell kombiniert werden können, ergeben sich neue Möglichkeiten und Anwendungen der Modellvereinfachung unter Berücksichtigung wichtiger hydrodynamischer Aspekte (u. a. Digitaler Zwilling).*

## Automated model transformation of hydrodynamic urban drainage models into simplified hydrologic models

*Detailed (hydrodynamic) sewer network models are computationally time-consuming, especially for complex networks. This article describes an automated procedure that generates an immediately executable fast simplified (hydrological) sewer network model from a hydrodynamic sewer network model. The fact that, within the Simba# simulator, hydrodynamic and hydrological modelling approaches can be combined in one model opens up new possibilities and applications for model simplification, taking into account important hydrodynamic aspects (e.g. digital twin).*

### Einführung

Zahlreiche Aufgaben in Planung und Betrieb von Kanalnetzen erfordern die Simulation und die Bewertung vieler verschiedener möglicher Optionen und/oder die Analyse längerer Zeiträume. Typische Aufgabenstellungen beinhalten beispielsweise die Abschätzung des Potenzials von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen, die Beurteilung der Auswirkungen von Einleitungen aus Kanalnetz und Kläranlage in Fließgewässer (vgl. DWA M102-3 [1]) sowie die Potenzialabschätzung einer Steuerung und die Implementierung eines Digitalen Zwillings oder einer modellprädiktiven Kanalnetzsteuerung mit einem hochperformanten internen Modell. Traditionell werden einige dieser Aufgaben mit einem vereinfachten (hydrologischen), mit kürzerer Rechenzeit laufenden, Modell („Schmutzfrachtmodell“)

durchgeführt. Dies hat sich für viele Anwendungen bewährt, erforderte jedoch einen nicht unbeträchtlichen Aufwand für die Erstellung derartiger Modelle.

Heutzutage sind häufig entweder direkt detaillierte hydrodynamische Modelle verfügbar (hydraulische Planung) oder es ist eine GIS-Datenbank des Kanalnetzes vorhanden, aus dem bei 1-zu-1-Übertragung ebenfalls ein hydrodynamisches Modell erzeugt werden könnte.

Hieraus ergibt sich die Chance, vereinfachte hydrologische Modelle automatisiert zu erzeugen. Jedoch ergeben sich dabei die folgenden zwei Herausforderungen:

- Die Ableitung eines vereinfachten hydrologischen Modells aus einem detaillierten, hydrodynamischen Modell ist bislang zeitaufwändig (trotz vorhandener, teils in Simulationssystemen

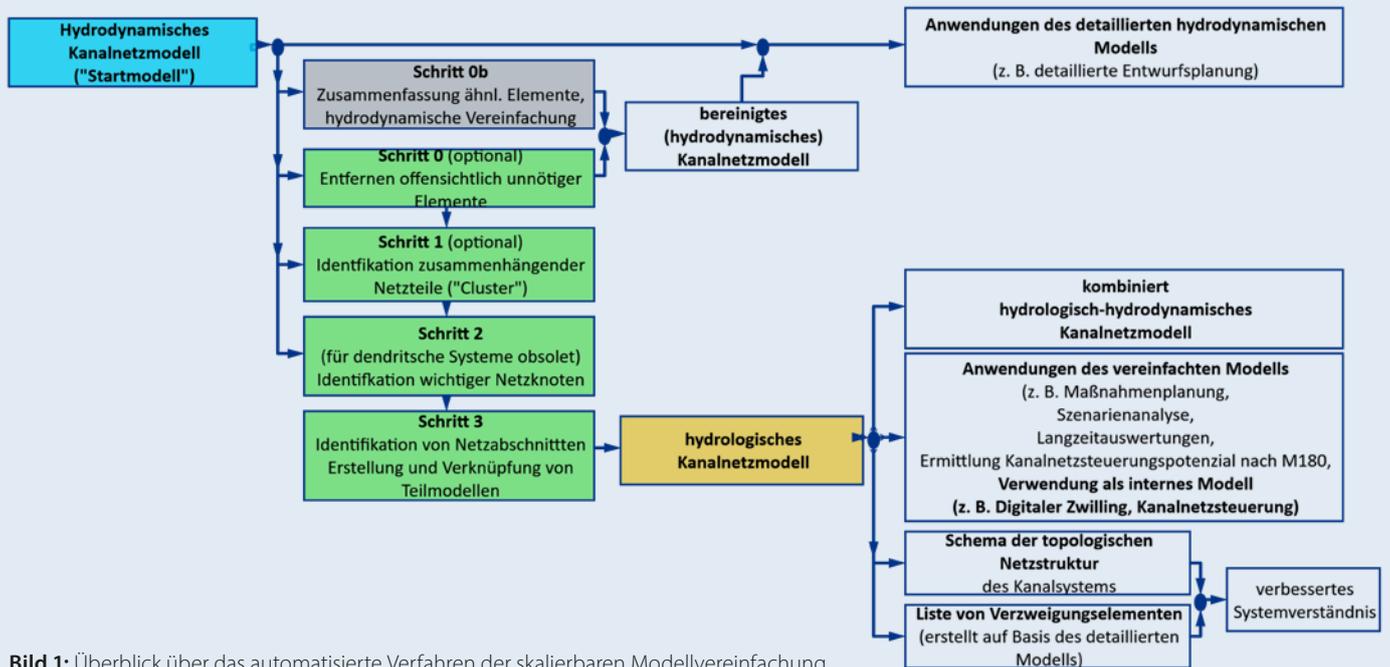


Bild 1: Überblick über das automatisierte Verfahren der skalierbaren Modellvereinfachung

integrierter Werkzeuge für Teilaufgaben, vgl. z. B. Jakobsen et al. [2]) und erfordert zahlreiche manuelle Entscheidungen. Dies macht den Vereinfachungsprozess aufwändig, subjektiv und fehleranfällig.

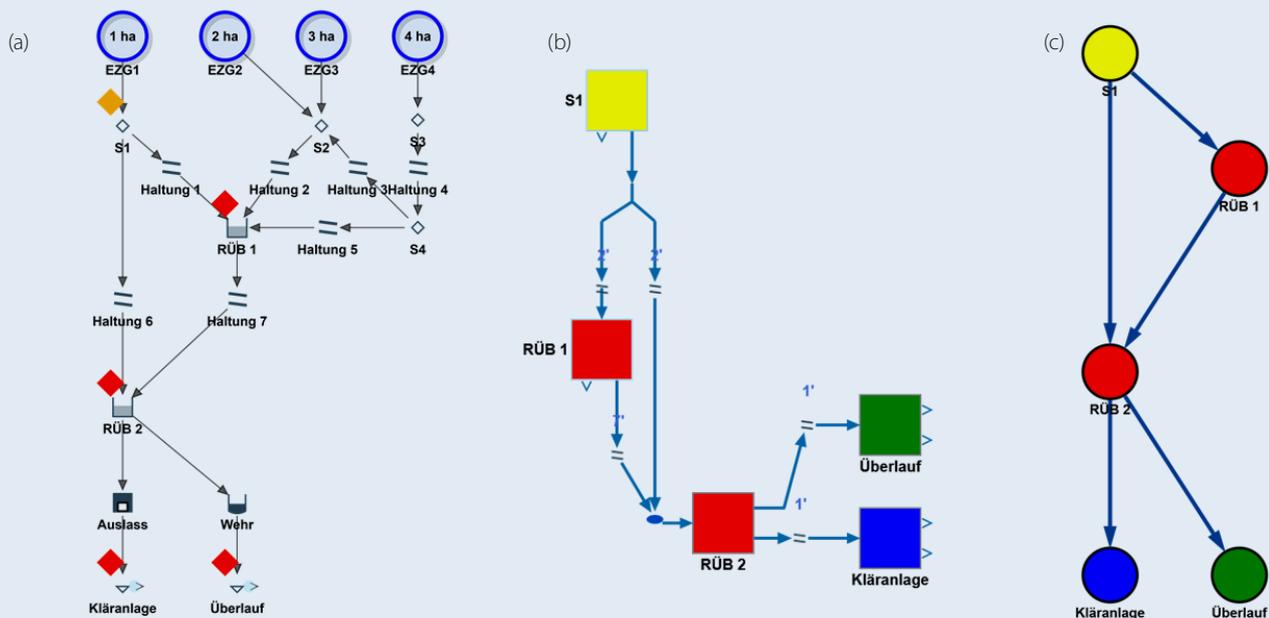
- Vereinfachte hydrologische Modelle vermögen vermaschte Netze sowie hydrodynamische Sondereffekte, wie sie gerade in größeren oder zu steuernden Systemen auftreten, wie z. B. Rückstau und Einstau, nicht oder nur ungenügend zu berücksichtigen, so dass die Verwendung rein hydrologischer Modellansätze nicht immer sinnvoll ist. Als „Ausweg“ werden in der Praxis oft vereinfachte hydrodynamische Modelle (Grobmodelle mit beispielsweise ca. 3.000 Haltungselementen) verwendet, die unter Berücksichtigung der Courant-Bedingung (beispielsweise unter Vermeidung sehr kurzer Haltungslängen) erstellt werden. Jedoch erfüllen auch derartige Grobmodelle in der Regel nicht die hohen Rechenzeitanforderungen, wie sie sich für die Auswertung vieler Optionen über lange Zeitabschnitte oder als Verwendung als internes Modell einer Steuerung oder eines Digitalen Zwillings ergeben. Beispielsweise sollte, wie einfache Überlegungen zeigen, ein Modell für die Verwendung als internes Modell im Rahmen einer Kanalnetzsteuerung für die Simulation eines Tages nicht mehr als ca. zehn Sekunden benötigen.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methodik zur Modellvereinfachung vor, welche aus einem hydrodynamischen Kanalnetzmodell (einschließlich Maschen) innerhalb von wenigen Sekunden bis Stunden (je nach Größe und Komplexität des Ausgangsmodells) automatisch ein sofort lauffähiges hydrologisches Kanalnetzmodell erstellt. In einem zweiten Schritt kann nun das automatisiert generierte hydrologische Modell in denjenigen Netzteilen, wo

dies sinnvoll oder notwendig erscheint (bspw. rückstaugefährdete flache Hauptsammler) durch eine hydrodynamische Modellierung dieser Netzteile ersetzt und nahtlos in das Gesamtmodell integriert werden. Hierbei wird ein Feature des Simulationssystems Simba# [3] verwendet, welches nicht nur die vollständige (d. h. auf dem vollständigen Saint-Venant-Differenzialgleichungssystem basierende) hydrodynamische sowie die hydrologische Kanalnetzmodellierung umfasst, sondern auch die Kombination beider Ansätze in ein- und demselben Kanalnetzmodell sowie auch Verzweigungen innerhalb eines hydrologischen Modells [4, 5] erlaubt.

Die automatisierte Erstellung vereinfachter Modelle erlaubt auch Vereinfachungen in der Datenhaltung – es müssen nicht mehr mehrere Datenquellen parallel gehalten werden (z. B. Kanalinformationssystem, detailliertes Modell, vereinfachtes Modell), sondern das vereinfachte Modell kann jederzeit, sozusagen auf Knopfdruck, aus der Datenbasis des detaillierten Modells (oder direkt aus den Informationen eines Kanalinformationssystems) erzeugt und somit stets aktuell gehalten werden.

Die Erstellung von vereinfachten hydrodynamischen oder hydrologischen Modellen (zuweilen auch als „Ersatzmodell“ oder „Surrogatmodell“ bezeichnet) ist nicht per se neu (vgl. beispielsweise die Arbeiten von Meirlaen und Vanrolleghen [6], Schindler et al. [7], Fischer et al. [8], Ocampo Martinez [9], Kroll [10], Pichler et al. [11]), aber die Integration eines vollständigen, automatisierten Verfahrens, das eine Vereinfachung von Kanalnetzmodellen einschließlich typischer Merkmale wie Netzmaschen und die Erstellung eines hydrologischen Ersatzmodells auch für sehr große Netze in begrenzter Zeit ermöglicht, in ein Simulationssystem, das auch aktuelle Entwicklungen beinhaltet, stellt ein Novum dar. Beispielsweise werden bei der Modelltransformation und bei



**Bild 2:** Demonstrationsmodell: (a) detailliertes hydrodynamisches Modell, (b) vereinfachtes Modell (jedes der farbige dargestellte Submodelle besteht aus einer Modellstruktur, wie sie in Abbildung 3 gezeigt wird), (c) topologische Karte

der Simulation eine beliebige Anzahl von Flächenkategorien undurchlässiger Flächen mit unterschiedlichem Verschmutzungsgrad nach DWA/BWK A102-2/A3-2 [12] berücksichtigt. Auch neuere Forschungsarbeiten zur topologischen Analyse von Netzstrukturen (z. B. Bartos und Kerkez [13], Hesarkazzazi et al. [14], Reyes-Silva et al. [15], Simone et al. [16]) fokussierten nicht auf diesem Anwendungsaspekt, lieferten jedoch Input für das hier vorgestellte Verfahren.

Auch wurden bereits Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Aufgabenstellung der Modellvereinfachung angewandt und erprobt (vgl. z. B. Weiske et al. [17], Palmitessa et al. [18]), jedoch waren die erlernten Ersatzmodelle (basierend auf Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN)) bislang entweder nur mäßig erfolgreich oder sie sind für komplexe Kanalnetze noch nicht praxistauglich nutzbar. Zudem wird das durch das vorhandene Detailmodell bereits vorhandene und beschriebene Domänenwissen nicht in vollem Umfang genutzt. Ein Hauptnachteil von KNN-Modellen ist jedoch durch ihre mangelnde Erklärbarkeit („Black Box model“) und ihre mangelnde Modifizierbarkeit (selbst kleine Netzveränderungen erfordern ein erneutes Lernen des Ersatzmodells) gegeben. Dennoch wird für spezielle Teilaufgaben der Stadtentwässerung ein großes Potenzial der Anwendung von KI-Techniken gesehen [19].

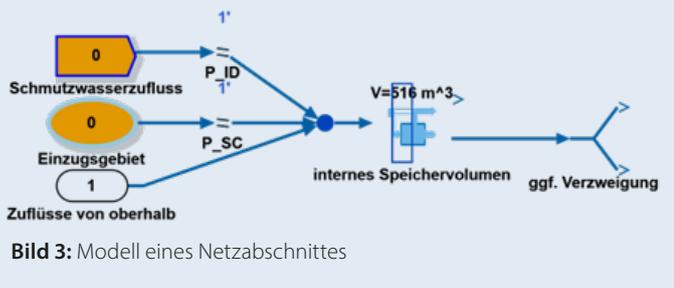
## Methodik

Ausgangspunkt des Modellvereinfachungsverfahrens ist ein hydrodynamisches (detailliertes) Modell des betrachteten städtischen Entwässerungsnetzes (als „Startmodell“ bezeichnet), das im Simba#-Simulator [3] implementiert ist. Neben vielen weiteren Funktionalitäten beinhaltet Simba# die Modellierung der

Niederschlags-Abfluss-Prozesse und löst die vollständigen Saint Venant-Gleichungen für die hydrodynamische Kanalnetzsimulation. Abwasserinhaltsstoffe mit ihren Transport- und Umwandlungsprozessen können ebenfalls berücksichtigt werden. Schnittstellenroutinen ermöglichen den Import von Kanalnetzen, die in anderen Simulatoren wie z. B. SWMM [20] oder System-Extran [21] implementiert sind. Das Verfahren zur skalierbaren Modellvereinfachung besteht aus vier Schritten (vgl. Schütze et al. [5]), die in **Bild 1** zusammengefasst sind.

Schritt 0 besteht in einer vorbereitenden Analyse des Netzes, bei der nicht angeschlossene Einzelknoten oder Leitungsabschnitte ohne Zuflüsse identifiziert und ggf. gelöscht werden. Derartige Netzelemente sind zuweilen in Kanalnetzmodellen enthalten, wenn sie aus GIS-Informationen erstellt worden sind. Eine Erweiterung von Schritt 0 (hier als „Schritt 0b“ bezeichnet) würde darin bestehen, Rohre und Teileinzugsgebiete mit ähnlichen Merkmalen zusammenzufassen, wie dies von vielen Forschern vorgeschlagen wurde (z. B. Schindler et al. [7], Kroll [10], Pichler et al. [11]) und was in der Tat gängige Praxis bei der Anwendung von hydrodynamischen Modellen ist. Eine derartige Zusammenfassung von Halteelementen ähnlicher Charakteristik ist oft auch für die Einhaltung der Courant-Bedingung erforderlich. Allerdings bringt eine solche Reduktion in der Regel noch nicht die für die Analyse großer Suchräume und/oder zahlreicher Langzeitsimulationsläufe erforderliche Simulationsleistung. Da diese Reduzierungen von Schritt 0b durch die derzeitige Modellierungspraxis (bspw. Erstellung eines hydrodynamischen Grobmodells) abgedeckt sind, wird dieser Schritt 0b in diesem Beitrag nicht weiter behandelt.

Der optionale Schritt 1 zielt auf die Identifizierung der im Startmodell enthaltenen topologisch unabhängigen Teilnetze ab.

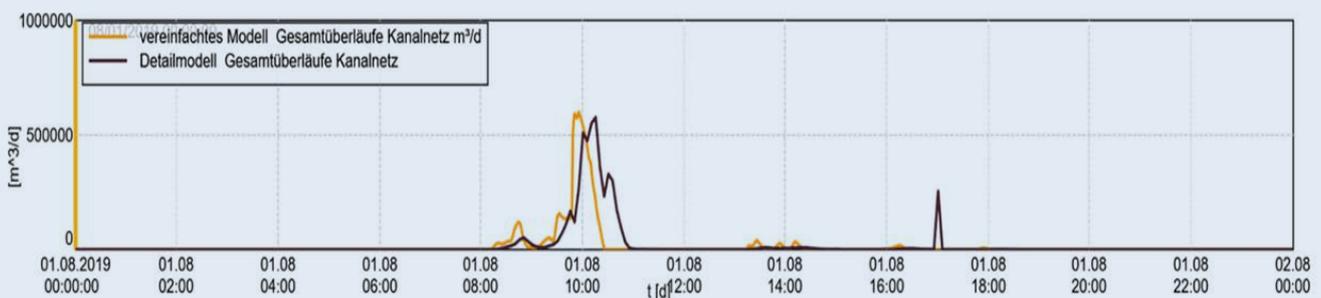


Während es in einigen Fällen (z. B. bei getrennten, isolierten Siedlungsgebieten) offensichtlich ist, dass ihr Netz völlig unabhängig von den anderen Abschnitten ist, ist die Identifizierung unabhängiger Netze in anderen Fällen nicht so offensichtlich (z. B. getrennte Regenwassernetze innerhalb einer Stadt). In Schritt 1 wird die vollständige Menge topologisch unabhängiger Netzteile (hier als „Cluster“ bezeichnet) ermittelt, indem eine topologische Backtracking-Analyse ausgehend von allen Endpunkten des Systems durchgeführt wird. In den nachfolgenden Schritten kann man sich dann ggf. auf die jeweils interessierenden Cluster fokussieren. In vielen Fällen wird das modellierte Netz jedoch aus nur einem Cluster bestehen, der das gesamte Netz umfasst.

In Schritt 2 spezifiziert der Benutzer besonders relevante Netzelemente, die auf jeden Fall auch in das vereinfachte Modell aufgenommen werden sollen. Dies sind in der Regel die (wichtigsten) Systemauslässe, Hauptsammler, Mischwasserbauwerke, aber auch Sonderbauwerke wie Düker oder wichtige Pumpstationen. Durch die Auswahl dieser Elemente kann der Benutzer den Grad der Vereinfachung beeinflussen. **Bild 2** illustriert das Vorgehen anhand eines (sehr einfachen) Beispielnetzes – mit rot sind diejenigen Netzelemente markiert, die in diesem Beispiel als Ausgangselemente für Schritt 2 ausgewählt wurden. Durch eine topologische Analyse des Netzes werden in Schritt 2 diejenigen Netzelemente identifiziert, die hinzugefügt werden müssen, um eine (topologisch) vollständige Beschreibung des vereinfachten Netzes zu erhalten (orange markiert) und die Einzugsgebietsflächen korrekt aufzuteilen. Für rein dendritische Kanalnetze kann Schritt 2 übersprungen werden und mit der getroffenen Elementeauswahl unmittelbar Schritt 3 durchlaufen werden.

Auf der Grundlage der im vorangegangenen Schritt identifizierten Elemente wird im Hauptteil des Verfahrens – Schritt 3 – das vereinfachte Modell erstellt, wobei für jeden Netzabschnitt ein vereinfachtes Teilmodell erstellt wird (siehe **Bild 3**); hierbei entspricht jeder Netzabschnitt einem der in Schritt 2 durch die topologische Analyse identifizierten Elemente. Dieser Schritt umfasst auch die automatische Berechnung der Kapazitäten und der nichtlinearen Speicherkennlinien (Wasserstands-Volumen-Beziehungen) innerhalb jedes Netzabschnitts unter Berücksichtigung der Geometriedaten aller Rohre des detaillierten hydrodynamischen Modells, die diesem Netzabschnitt zugeordnet sind. Jeder Netzabschnitt aggregiert die Flächen (unter Beibehaltung der verschiedenen Kategorien von durchlässigen und undurchlässigen Flächen gemäß DWA-A102-2 [12]) und deren Niederschlagsabfluss-Parametern, während die Kanalvolumina und -eigenschaften in einer Kombination aus Becken, ggf. mit Stauraumvolumen, und Sammlerelement aggregiert werden. Darüber hinaus wird neben dem vereinfachten Modell auch eine topologische Übersicht (grafische Darstellung der Netzstruktur des vereinfachten Modells) erstellt, die dem Nutzer ein schnelles und einfaches Verständnis der Netzstruktur auch bei komplexen Netzstrukturen des Originalnetzes ermöglicht. **Bild 2** zeigt (b) das vereinfachte Modell und (c) die entsprechende topologische Übersicht für das Beispielnetz. Wann immer das Verfahren einen wesentlichen Verzweigungspunkt innerhalb eines Systems identifiziert, wird dieser unter Berücksichtigung der Eigenschaften der zu- und abgehenden Rohre im vereinfachten Modell integriert und zudem in eine Ausgabeliste eingetragen, die es ermöglicht, die automatisiert getroffenen Annahmen bzgl. des proportionalen oder priorisierenden Abflussverhaltens an diesen Verzweigungspunkten zu überprüfen.

Das erzeugte vereinfachte Modell ist sofort lauffähig (mit einem frei definierbaren Simulationszeitschritt), kann aber auch einer Kalibrierung und Validierung unterzogen werden. Netzabschnitte, von denen bekannt ist, dass sie bedeutenden hydrodynamischen Effekten unterliegen (z. B. Rückstauereffekte in Hauptsammlern), können nun auch durch die entsprechenden Teile des detaillierten hydrodynamischen Modells ersetzt werden, da Simba# die Möglichkeit bietet, hydrologische und hydrodynamische Modellierungsmodule innerhalb desselben



**Bild 4:** Vergleich der Resultate von vereinfachtem und detailliertem Modell (Summe der Überläufe)

**Tabelle 1:** Netzmerkmale der vier Anwendungsfälle und Kennzahlen des Vereinfachungsalgorithmus

|   | Kanalnetz 1      | Kanalnetz 2     | Kanalnetz 3      | Kanalnetz 4      |
|---|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Anzahl Einzugsgebiete:                                    | 47               | 1658            | 11245            | 33446            |
| Anzahl Rohre:   | 56               | 738             | 23188            | 41139            |
| Anzahl Schächte + Speicherschächte:                       | 57               | 721             | 23286            | 38615            |
| <b>Simulationszeit* für 1 Tag (Detailmodell)</b>          | <b>6,3 Sek.</b>  | <b>16 Min.</b>  | <b>3 Stunden</b> | <b>9 Stunden</b> |
| Schritt 0: Anzahl Löscharer Knoten                        | 4                | 71              | 3997             | 6321             |
| Schritt 1: Anzahl Teilnetze vorher                        | 1                | 3               | 188              | 9                |
| Schritt 1: Anzahl Teilnetze hinterher                     | 1                | 1               | 1                | 1                |
| Schritt 2: vom Nutzer gewählte Elemente                   | 9                | 4               | 40               | 100              |
| Schritt 2/3: Anzahl identifizierter Netzabschnitte        | 9                | 8               | 58               | 241              |
| Schritt 3: Anzahl wesentlicher Verzweigungspunkte         | 0                | 4               | 16               | 142              |
| <b>Simulationsdauer* für 1 Tag (vereinfachtes Modell)</b> | <b>0,09 Sek.</b> | <b>0,5 Sek.</b> | <b>0,4 Sek.</b>  | <b>3,5 Sek.</b>  |
| Laufzeit (einmalig) der Vereinfachungsprozedur:           |                  |                 |                  |                  |
| Schritt 0: Entfernen unnötiger Elemente                   | <0,1 Sek.        | 0,3 Sek.        | 3,6 Min.         | 15,8 Min.        |
| Schritt 1: Identifikation zusammenhängender Netzteile     | <0,1 Sek.        | 1,7 Sek.        | 4,1 Min.         | 71,3 Min.        |
| Schritt 2: Identifikation wichtiger Netzknoten            | <0,1 Sek.        | 0,2 Sek.        | 5,3 Min.         | 45,9 Min.        |
| Schritt 3: Erstellung des vereinfachten Modells           | 1,6 Sek.         | 2,3 Sek.        | 2,3 Min.         | 178,9 Min.       |
| Summe:  | 1,9 Sek.         | 4,5 Sek.        | 15,3 Min.        | 311,9 Min.       |

\*verwendeter Simulationszeitschritt: 5'' bzw. 10'' im Detailmodell und 1' im vereinfachten Modell verwendeter Rechner: Laptop (i7, 2.8 GHz, 32 GB RAM)

Modells zu kombinieren [22]. Auf diese Weise erhält man ein vereinfachtes Modell, das sich durch hohe Leistungsfähigkeit auszeichnet und dennoch wichtige hydrodynamische Eigenschaften beibehält.

## Fallstudien

Das beschriebene Verfahren wurde auf mehrere reale Abwassersysteme unterschiedlicher Komplexität und Charakteristik aus verschiedenen Ländern (Deutschland, Kanada, Kolumbien) angewandt (siehe **Tabelle 1**). Bei den Systemen handelt es sich um Kombinationen aus Misch- und Trennkansalisationen, die aus praktischen Anwendungsprojekten stammen und somit keine rein akademischen Beispiele darstellen. **Tabelle 1** fasst in ihrem ersten Teil einige Hauptmerkmale der in diesen Projekten verwendeten hydrodynamischen Netzmodelle zusammen. Die erforderlichen Simulationszeiten hängen natürlich von einer Reihe von Einstellungen ab, aber für jedes der hier behandelten Netze wurden typische Simulationseinstellungen gewählt. In jedem dieser Projekte ist eine große Anzahl potenzieller Maßnahmen zu analysieren, so dass eine direkte Verwendung der detaillierten Modelle (ohne Vereinfachung) nicht durchführbar wäre (außer bei Netz Nr. 1, dem kleinsten Beispiel).

## Ergebnisse und Diskussion

Der untere Abschnitt von **Tabelle 1** enthält einige Kennzahlen zu den Schritten des Vereinfachungsverfahrens. Es ist zu erkennen, dass die Modellvereinfachung in einer erheblichen Verkürzung der Simulationszeit resultiert (um bis zu mehrere Zehnerpo-

tenzen). Gegenüber einer früheren Version dieser Methodik [5] konnte eine Leistungssteigerung erreicht werden. Selbst wenn man bedenkt, dass sich die Simulationszeiten des vereinfachten Modells, wie sie in **Tabelle 1** angegeben sind, auf ein hydrologisches Modell beziehen – und dass die Ersetzung einiger Netzabschnitte durch ihre hydrodynamischen Gegenstücke die Simulationszeiten in gewissem Maße erhöht –, verfügt selbst das kombinierte hydrologisch-hydrodynamische Simulationsmodell über Simulationszeiten, die es erlauben, Simulationsläufe für eine große Anzahl von Szenarien/Optionen und/oder unter langfristigen Bewertungsszenarien durchzuführen und/oder es als internes Modell in einer modellprädiktiven Kanalnetzsteuerung oder eines Digitalen Zwillings zu verwenden.

Natürlich muss die Gültigkeit des vereinfachten Modells im Detail bestätigt werden (und gegebenenfalls eine Kalibrierung – Validierung, ggf. auch anhand plausibilisierter Messdaten, durchgeführt werden), aber mit den erreichten kurzen Simulationszeiten, nachdem der Hauptschritt der topologischen Modellvereinfachung, wie in diesem Artikel vorgestellt, erreicht wurde, ist dies leicht und effizient durchführbar. Exemplarisch zeigt **Bild 4** einen Vergleich der Resultate des vereinfachten Modells (unkalibriert) mit denen des detaillierten Modells (Summe der Überläufe in Kanalnetz 3 im Verlauf eines Tages bei ungleichmäßiger Überregnung). Systematische Ganglinienvergleiche über längere Zeiträume unter simultaner Verwendung mehrerer Vergleichskriterien (Nash-Sutcliffe-Efficiency, Maximalwertabweichung, Volumenbilanzfehler) nach Henrichs [23] ergaben spontan (ohne detaillierte Nachkalibrierung) gute bis zufriedenstellende Übereinstimmungen von Kläranlagenzuläufen und Mischwasserüberläufen.

## Schlussfolgerungen und zukünftige Arbeiten

Es wurde eine Methode zur automatisierten Vereinfachung detaillierter hydrodynamischer Modelle zu hochperformanten hydrologischen Modellen entwickelt und auf verschiedene Netze unterschiedlicher Größe angewandt, darunter auch stark vermaschte und komplexe Netze. Selbst das größte der untersuchten Netze konnte in weniger als sechs Stunden vereinfacht werden. Der Grad der Vereinfachung kann skaliert werden; außerdem können durch die Kombination hydrodynamischer und hydrologischer Modellierungsansätze in dem vereinfachten Modell auch hydrodynamische Effekte berücksichtigt werden. Topologische Übersichten, die als „Nebenprodukt“ entstehen, erleichtern das Verständnis der Struktur des untersuchten Kanalnetzes. Solche vereinfachten Modelle kann u. a. zur Abschätzung des Steuerungspotenzials eines Kanalnetzes über den Zentralbeckenansatz (vgl. DWA-M180 [24]) verwendet werden. Bei vorhandenem Steuerungspotenzial kann das vereinfachte Modell unmittelbar als internes Modell in einer modellprädiktiven Kanalnetzsteuerung (vgl. Schütze und Alex [25]) verwendet werden, da das Simulationssystem Simba# die Verwendung jedes beliebigen Simba#-Modells als internes Modell einer modellprädiktiven Regelung erlaubt. Des Weiteren eignet sich ein vereinfachtes Kanalnetzmodell auch für eine Kopplung mit Kläranlagen- und Gewässergütemodellen – was etwa im Sinne des DWA-Merkblattes M102-3 [1] – von Nutzen ist [22]. Nachdem sich dieser Beitrag auf die Darstellung der Modellvereinfachungsmethodik konzentriert hat, wird die Nutzung von derartig vereinfachten Modellen für die genannten Anwendungsfelder Themen weiterer Artikel bilden.

## Danksagung

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie der Forschungsförderungsagentur der Republik Kolumbien (COLCIENCIAS) wird für die Unterstützung der Arbeit an den verschiedenen Fallstudien gedankt (Förderkennzeichen 02WDG1641C, 02WEE1627B, 669/2014).

## Literatur:

- [1] DWA/BWK (2021): Merkblatt DWA-M 102-3/BWK M-3-3 – Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 3: Immissionsbezogene Bewertungen und Regelungen – Oktober 2021.
- [2] Jakobsen, C., Hansen, D.B., Harremoës, P. (1993): Development and application of a general simulator for rule based control of combined sewer systems. 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage. Niagara Falls, 1357–1362.
- [3] ifak (2024): Simba#, Version 6, Manual, ifak e. V., Magdeburg, Germany.
- [4] Schütze, M., Alex, J. (2022): A Multi-Domain Solver for integrated modeling; 12<sup>th</sup> Urban Drainage Modelling (UDM) conference; Costa Mesa, USA, 10.–12.01.2022.
- [5] Schütze, M., de Matos, K., Schmidt, T., Alex, J. (2024): Scalable model simplification for hydrodynamic sewer system models, 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Urban Drainage, Delft, 09.–14.06.2024.
- [6] Meirlaen, J., Vanrolleghem, P. (2002): Model reduction through boundary relocation to facilitate real-time control optimisation in the integrated urban wastewater system, *Water Science and Technology*, 45, 4–5, 373–381.
- [7] Schindler, N., Krebs, P., Ogurek, M., Schütze, M. (2007): Vereinfachte integrierte Modelle der Abwasserentsorgung zur Analyse von Steuerungsstrategien. *KA-Abwasser, Abfall*, 54, 6, 577–583.
- [8] Fischer, A., Rouault, P., Kroll, S., Van Assel, J., & Pawlowsky-Reusing, E. (2009): Possibilities of sewer model simplifications. *Urban Water Journal*, 6(6), 457–470. <https://doi.org/10.1080/15730620903038453>
- [9] Ocampo Martínez, C. (2010): *Model-based Predictive Control of Wastewater Systems*, Springer.
- [10] Kroll, S. (2019): *Design of Real-Time Control Strategies for Combined Sewer Networks*; PhD thesis; Katholieke Universiteit Leuven.
- [11] Pichler, M., König, A., Reinstaller, S., Maier, R., Muschalla, D. (2024): Automatisierte Vereinfachung städtischer Entwässerungsmodelle; *Aqua Urbanica* 2024, Graz, 22.–24.09.2024, <https://doi.org/10.3217/gyxcd-4g982>
- [12] DWA/BWK (2020): Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 – Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen – Dezember 2020.
- [13] Bartos, M., Kerkez, B. (2019): Hydrograph peak-shaving using a graph-theoretic algorithm for placement of hydraulic control structures, *Advances in Water Resources*, 127, 167–179.
- [14] Hesarkazzazi, S., Bakhshipour, A.E., Hajjibabaei, M., Dittmer, U., Haghighi, A., Sitzenfrei, R. (2022): Battle of centralized and decentralized urban stormwater networks: From redundancy perspective, *Water Research*, 222, 118910.
- [15] Reyes-Silva, J.D., Zischg, J., Klinkhamer, C., Rao, P.S.C., Sitzenfrei, R., Krebs, P. (2020): Centrality and shortest path length measures for the functional analysis of urban drainage networks, *Applied Network Science*, 5, 1.
- [16] Simone, A., di Cristo, C., Guadagno, V., del Giudice, G. (2023): Sewer networks monitoring through a topological backtracking, *Journal of Environmental Management*, 346, 119015.
- [17] Weiske, F., Ogurek, M., Schütze, M. (2023): Machine Learning in SIMBA# am Beispiel einer Kanalnetzsteuerung; 29. Simba-Anwendertreffen; Blankenburg/Harz, 09.–10.05.2023.
- [18] Palmitessa, R., Grum, M., Engsig-Karup, A.P., Löwe, R. (2022): Accelerating hydrodynamic simulations of urban drainage systems with physics-guided machine learning. *Water Research* 223, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118972>
- [19] Ogurek, M., Alex, J., Schütze, M. (2024): Integration of selected AI methods into a simulation tool for urban wastewater systems – towards practical application; at – Automatisierungstechnik, 72, 6, 547–563. <https://doi.org/10.1515/auto-2023-0236>
- [20] Rossman, L. A. (2015): *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.*, US Environmental Protection Agency.
- [21] itwh (2022): *Hystem-Extran, Version 8.5, Documentation*, itwh GmbH, Hannover, Germany.
- [22] Alex, J., Schütze, M., Hübner, C., Ogurek, M. (2024): A multi-solver simulation environment for resilience analysis of drinking water and wastewater networks; *Water Practice and Technology*; 10.2166/wpt.2024.216.
- [23] Henrichs, M. (2015): Einfluss von Unsicherheiten auf die Kalibrierung urban-hydrologischer Modelle; Dissertation; Technische Universität Dresden.
- [24] DWA (2005): Merkblatt DWA-M 180 - Handlungsrahmen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen – Dezember 2005.
- [25] Schütze, M., Alex, J. (2022): Steuerung und Regelung von Abwasserkanalnetzen – ein praxismethodischer Ansatz zur modellprädiktiven Regelung; *Automation* 2022; Baden-Baden, 28.–29.06.2022; VDI-Berichte 2399, VDI-Verlag Düsseldorf GmbH; ISBN 978-3-18-102399-0; 187–204.

## Autor:

### Dr. Manfred Schütze

Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak),  
Geschäftsfeld Wasser und Energie  
Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg  
[manfred.schuetze@ifak.eu](mailto:manfred.schuetze@ifak.eu)